

基于最优插值法的渤海 CLDAS 海面风客观订正

史得道^{1,2}, 苏杭², 刘德昊², 韩沛沛²

(1.天津市海洋气象重点实验室,天津 300074;2.天津海洋中心气象台,天津 300074)

摘要: 利用环渤海沿岸及海上 125 个站点的观测数据,采用最优插值法对中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)10 m 风实况分析数据进行融合订正。结果表明:订正后的 CLDAS 数据与观测数据的相关系数由 0.89 增大到 0.99,平均绝对误差由 1.02 m/s 减小到 0.27 m/s,均方根误差由 1.63 m/s 减小到 0.36 m/s。在渤海湾、莱州湾、辽东湾、渤海中部、渤海海峡不同海区中,莱州湾的订正效果最好,平均绝对误差和均方根误差都减小了 81.4% 左右。不同风力等级的订正效果显示,3 级以下风的平均绝对误差由 0.5~1.0 m/s 减小到 0.3 m/s 以下,4~8 级风的平均绝对误差由 1.4~4.7 m/s 减小到 1.0 m/s 以下,9 级及以上风的平均绝对误差由 5.9 m/s 减小到 1.1 m/s,且不同等级风的预报准确率也得到明显提升。对 2021 年 1 月和 12 月两次大风过程进行检验,发现订正后的 CLDAS 数据的 10 m 风速明显增大,变化趋势和风速大值区与观测数据更加接近。

关键词: CLDAS;最优插值法;海上大风;客观订正

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)04-0037-11

0 引言

随着气象观测系统的迅猛发展,地面自动气象站、雷达、卫星等获取的观测数据越来越多,数值预报模式提供的数据质量也在不断提高,利用数据融合及同化技术,综合多种来源的观测资料及多模式数据,获得高精度、高质量、时空连续的多源融合格点数据成为行之有效的手段。中国气象局在 2014 年启动了国家气象科技创新工程“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”,国家气象信息中心在引进国际先进融合技术基础上消化吸收并自主创新,建立了业务化的中国气象局陆面数据同化系统(China Meteorological Administration Land Data Assimilation System, CLDAS)^[1-2]。该系统利用多重网格同化分析方法,以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)预报产品为背景场,融合了 4 万

多个国家级和区域自动气象站的逐小时观测数据^[3],可输出多个地面气象要素的多源融合网格实况分析产品,空间范围为 0°~60°N、70°~140°E,空间分辨率为 0.05°。

自研制成功以来,全国各地气象部门业务和科研人员针对 CLDAS 多源融合实况分析产品进行了大量地检验评估和业务应用。气温产品方面,龙柯吉等^[4]、刘莹等^[5]对 CLDAS 全国 2 m 气温产品进行了检验和适用性评估;齐铎等^[6]、董春卿等^[7]利用 CLDAS 气温数据对 ECMWF 高分辨率模式气温预报、中央气象台格点温度预报进行了客观订正;王丹等^[8]、杨富燕等^[9]对山西、贵州地区的 CLDAS 温度产品进行了检验和订正。降水产品方面,董祝雷等^[10]开展了 CLDAS 降水产品在内蒙古地区的适用性分析;穆建华等^[11]利用 CLDAS 格点降水资料开展了贺兰山区降水时空分布特征分析;朱科旭等^[12]利用 CLDAS 降水数据建立了青海省洪涝灾害预报模

收稿日期: 2024-07-11。

基金项目: 中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(23SWQXM006);天津市海洋气象重点实验室 2022 年度开放基金项目(2022-TKL0M03)。

作者简介: 史得道(1985-),男,高级工程师,硕士,主要从事海洋气象监测预报技术研究。E-mail:sdd0928@163.com

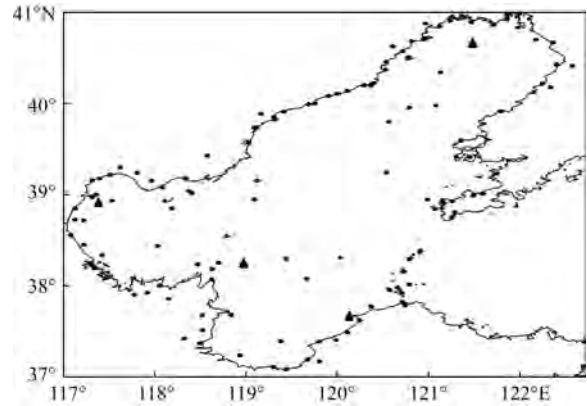
型。能见度产品方面,蒋雨荷等^[13]、龙柯吉等^[14]利用四川地区能见度实况分析产品开展了大雾过程的检验和适用性评估;郭阳等^[15]利用CLDAS能见度和相对湿度产品进行了雾、轻雾、霾的判识准确性分析;庄妍等^[16]利用CLDAS资料建立了湖北恩施山区成雾潜势指标。10 m风产品方面,李施颖等^[17]利用2019年四川省观测数据对CLDAS风速产品进行了评估;曾晓青等^[18]利用CLDAS风场产品作为实况场对ECMWF模式的10 m风预报产品进行了订正预报试验;俞剑蔚等^[19]对江苏省2017年7月—2018年6月CLDAS的10 m风进行了检验,结果发现该产品的风速较观测风速明显偏弱、准确率仅为56%;王丹等^[20]对陕西地区CLDAS 10 m风产品的质量检验发现,当实况风速在6级以上时,CLDAS的风速偏弱率达到了98%,平均绝对误差达到7.5 m/s;刘卫华等^[21]开展了CLDAS风场数据在辽宁省的适用性分析和评估。在目前研究中,尚未开展CLDAS 10 m风数据产品在渤海海域的应用及检验评估,且对该产品的客观订正研究较少。

大风是渤海区域经常出现的气象灾害^[22-24],会对海上作业、船舶航行、近岸靠泊、应急救援等造成较大影响,因此需要加强对该类气象灾害的精细化监测预警。近些年来,天津市气象局在渤海建设了18个海上石油平台观测站、1个大沽灯塔观测站,再结合环渤海其他省市气象部门建设的海上平台站、浮标站、海岛站等,丰富了海上实况观测产品,但站点的数量在整个渤海海域尚显不足,在近岸航道、锚地、部分海区等仍存在监测空白。为提高海上大风实况监测的精细化水平,本文利用环渤海沿岸及海上观测数据,对渤海地区CLDAS 10 m风实况分析产品进行融合订正,提高了CLDAS实况分析产品在渤海地区的准确度和可用性,对利用高分辨率的CLDAS产品进行渤海地区海上大风监测分析具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 数据

文中所用数据包括2021年1月1日—12月31日环渤海沿岸自动站、海上石油平台站、浮标站、海岛站等125个站点(见图1)逐小时的2 min平均风



注:黑色圆点为非独立检验站点,黑色三角为独立检验站点

图1 观测站点分布图

Fig.1 Distribution of observation stations

速、风向观测数据,以及逐小时的CLDAS-V2.0产品中的10 m风实况分析产品数据。所有数据来源于天津市气象信息中心气象大数据云平台,并经过质量控制。CLDAS 10 m风实况分析产品数据范围为117°~123°E,37°~41°N,空间分辨率为0.05°。125个站点的分布为:渤海湾31个、莱州湾17个、辽东湾54个、渤海中部9个、渤海海峡14个。

1.2 方法

1.2.1 双线性插值法

首先利用双线性插值法^[21],将0.05°分辨率的CLDAS 10 m风产品插值到各个站点上,得到每个站点的CLDAS 10 m风速数据。设 $w(x_1, y_1)$ 、 $w(x_1, y_2)$ 、 $w(x_2, y_1)$ 、 $w(x_2, y_2)$ 分别为站点周围4个网格点上的CLDAS 10 m风速,首先在x轴方向上进行两次线性插值:

$$w(x_1, y) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} w(x_1, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} w(x_1, y_2) \quad (1)$$

$$w(x_2, y) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} w(x_2, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} w(x_2, y_2) \quad (2)$$

然后再y轴方向上进行一次线性插值:

$$w(x, y) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} w(x_1, y) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} w(x_2, y) \quad (3)$$

式中: $w(x, y)$ 为双线性插值后站点上CLDAS 10 m风速值。

1.2.2 最优插值法

采用最优插值法,利用站点观测数据对

CLDAS 10 m风实况分析数据进行融合订正。该方法在气象领域应用较广,李建通等^[25]、韩焱红等^[26]利用最优插值法和观测站降水数据对雷达估测降水进行了订正,潘旸等^[27]、王福增等^[28]、蔡志颖等^[29]采用最优插值法开展了卫星反演降水资料与地面观测资料的融合试验,均取得了不错的效果。最优插值法的优点在于既考虑了各种观测误差的自相关关系,又考虑了不同观测的相关关系,权重函数不是距离的单变量函数,还涉及不同观测误差的相互影响,因此可以在分析点的一定范围内求解最优值^[27]。

以CLDAS 10 m风实况分析场为初估场,环渤海沿岸及海上观测数据为观测场,订正场上每个格点的风速值等于该点初估值与偏差值之和,偏差值由该格点周围一定范围内的观测值与初估值的偏差加权估计得到。计算公式为:

$$A_k = F_k + \sum_{i=1}^n W_{ki} (O_i - F_i) \quad (4)$$

式中: A 为订正值; F 为实况分析值; O 为观测值; k 为待订正格点; i 为订正格点周围一定范围内观测站点,总数为 n ; W_{ki} 为每个观测站点的权重系数。权重系数是通过建立矩阵方程组,使订正场的误差方差为最小而得到的。假定观测误差及其与偏差场之间的误差无关,并假定不同点的相关函数为各向均匀同性,则权重系数可由下式求得:

$$\sum_{j=1}^n (\mu_{ij} + \delta_i) W_{kj} = \mu_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: μ_{ij} 表示 i, j 两点相关函数; δ_i 为第 i 个观测点观测值的相对均方差,在实际计算中一般取为零。则上式可简化为:

$$\sum_{j=1}^n \mu_{ij} W_{kj} = \mu_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

两点的相关函数一般认为与两点之间的距离有关。根据前人的研究成果^[26, 29],相关函数通常取以下两种形式:

$$\mu = \exp(-r_{ij}/a) \quad (7)$$

$$\mu = \exp(-r_{ij}^2/a) \quad (8)$$

式中: a 为常数系数; r_{ij} 表示 i, j 两点之间的距离。研究表明^[26],当测站稀疏时适用公式(7),测站密集时适用公式(8)。对于渤海海域,海上站点并不算密集,因此按照公式(7)计算两个点之间的相关函数。

利用125个站点2021年1月1日—12月31日的逐小时观测数据,分别计算每个站点与其他站点的相关系数及距离,随着站点间距离的增大,相关系数呈现逐渐减小的趋势。当相关系数趋近于0时,选定此时的最小距离为最大影响半径,并利用公式(5)计算系数 a 的值。对于不同的 a 值,可以得到不同的 μ 值,当相关系数趋近于0时,可确定对应的 a 值。实际订正时,对于初估场的每一个格点,给出一个起始半径(比如2 km),然后搜索该半径范围内包含的观测站点数,若格点周围没有观测站点,则继续增大搜索半径,但不超过最大影响半径,直至每个格点周边至少有两个以上的观测站点参与订正。

实际订正时,选取121个站点参与订正(见图1中黑色圆点)并开展非独立检验。4个站点不参与订正(见图1中黑色三角形),分别为滨海新区南疆码头(站号A3176)、纪姆岛(站号54750)、锦州9号石油平台(站号54465)、渤中26号石油平台(站号54638),这4个站点分别为1个沿岸站、1个海岛站、2个海上石油平台站,分别位于渤海湾、莱州湾、辽东湾和渤海中部,比较有代表性,因此只进行订正后的独立性检验。

2 结果分析

2.1 非独立检验

对于121个非独立检验站点,CLDAS数据订正前后与观测数据的平均相关系数由0.89增大到0.99,订正前的相关系数大部分为0.70~0.95,而订正后基本为0.95~1.00(见图2a)。平均误差由-0.55 m/s减小到-0.05 m/s,订正前的误差基本为-2.0~0.5 m/s,CLDAS数据明显小于站点观测数据,而订正后的CLDAS数据与实况更加接近,绝大部分误差为-0.5~0.5 m/s(见图2b)。订正前后的平均绝对误差由1.02 m/s减小到0.27 m/s,订正前的绝对误差基本为0.5~2.5 m/s,而订正后绝大部分都在1.0 m/s内(见图2c)。订正前后的均方根误差由1.35 m/s减小到0.36 m/s,订正前的均方根误差基本为0.5~3.0 m/s,订正后绝大部分小于1.0 m/s(见图2d)。

分海区来看,渤海湾、莱州湾、辽东湾、渤海中部、渤海海峡5个海区站点的CLDAS数据与观测数

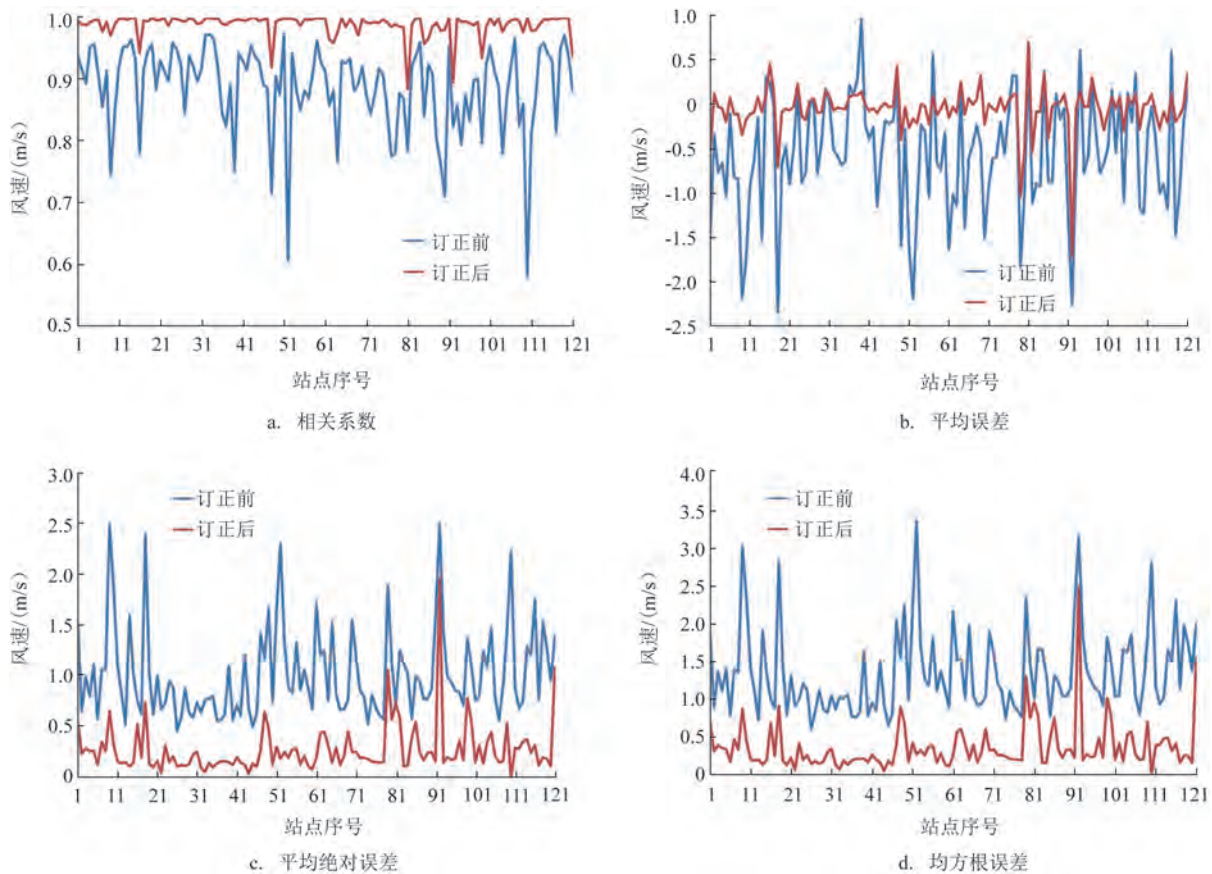


图2 非独立检验站点CLDAS数据与观测数据的检验结果

Fig.2 The inspection results at non independent testing stations between CLDAS data and observation data

据的相关系数在订正前为0.90左右,订正后都提升到0.98以上(见图3a),其中渤海海峡的订正效果最好,相关系数提升了14.3%。订正前5个海区站点的CLDAS数据与观测数据的平均误差为 $-0.7 \sim -0.2$ m/s,订正后都在 -0.1 m/s以内(见图3b),订正效果最好的是莱州湾,平均误差减小了101%。订正前5个海区站点的CLDAS数据与观测数据的平均绝对误差为 $0.7 \sim 1.3$ m/s,订正后都小于 0.4 m/s(见图3c),订正效果最好的是莱州湾,减小了81.4%。5个海区站点的CLDAS数据与观测数据的均方根误差订正前为 $0.9 \sim 1.7$ m/s,订正后都小于 0.5 m/s(见图3d),订正效果最好的也是莱州湾,平均减小了81.4%。

不同风力等级的订正效果显示,对于非独立检验站点,订正后CLDAS数据与观测数据的平均误差和平均绝对误差都明显减小(见图4a—b)。订正前1级风的平均误差大于0,说明CLDAS值大于观

测值;2级及以上风的平均误差小于0,说明CLDAS值小于观测值。订正后1级风(样本数为173 007)的平均误差由 0.29 m/s减小到 0.16 m/s,而2级风(样本数为313 765)由偏小 0.16 m/s转变为偏大 0.04 m/s。3级及以上风(样本数为227 759)的平均误差仍小于0,表示订正后的CLDAS风速仍小于观测风速,但误差减小了78%~89%。另外,订正后3级及以下风的平均绝对误差由 $0.5 \sim 1.0$ m/s减小到 0.3 m/s以下,4~8级风的平均绝对误差由 $1.4 \sim 4.7$ m/s减小到 1.0 m/s以下,9级及以上风的平均绝对误差由 5.9 m/s减小到 1.1 m/s,总体来看订正效果较好,平均绝对误差的减小比例为63%~82%,可见订正后CLDAS数据质量得到明显提升,且随着风力等级的增大,数据质量的提升效果越大。CLDAS数据准确率的检验结果也显示,订正后4级风(样本数为122 642)的准确率提升1倍以上,5级风(样本数为51 200)提升2倍,6级风(样本数为18 597)提升3.7

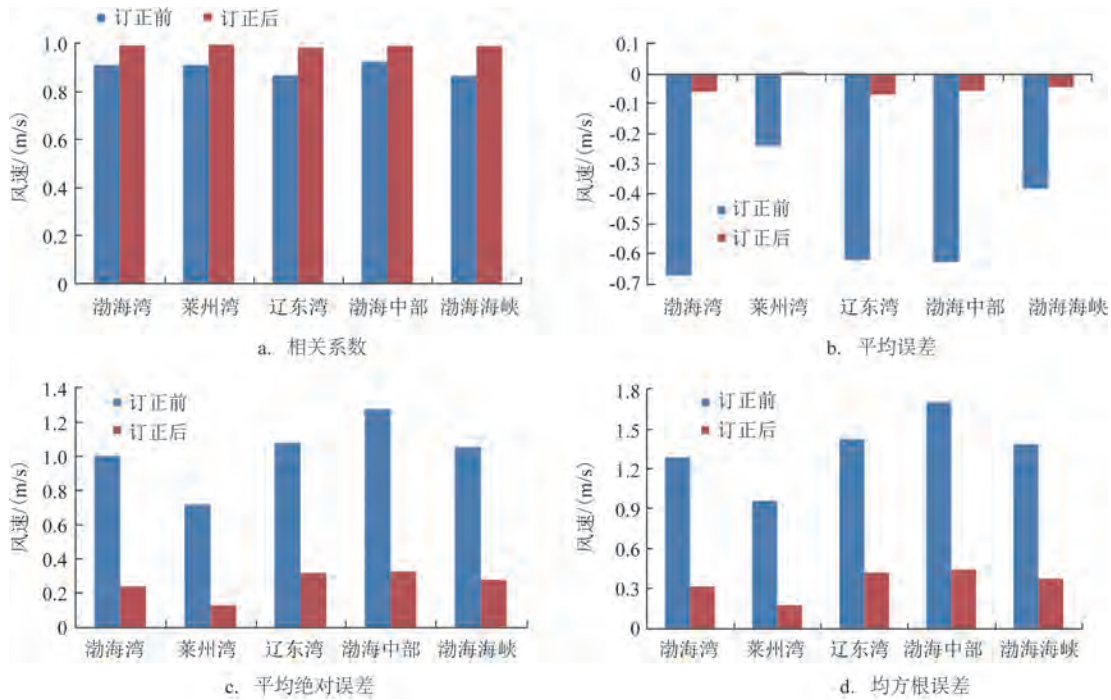


图3 渤海5个海区非独立检验站点CLDAS数据与观测数据的检验结果

Fig.3 The inspection results at non independent testing stations between CLDAS data and observation data in five areas of the Bohai Sea

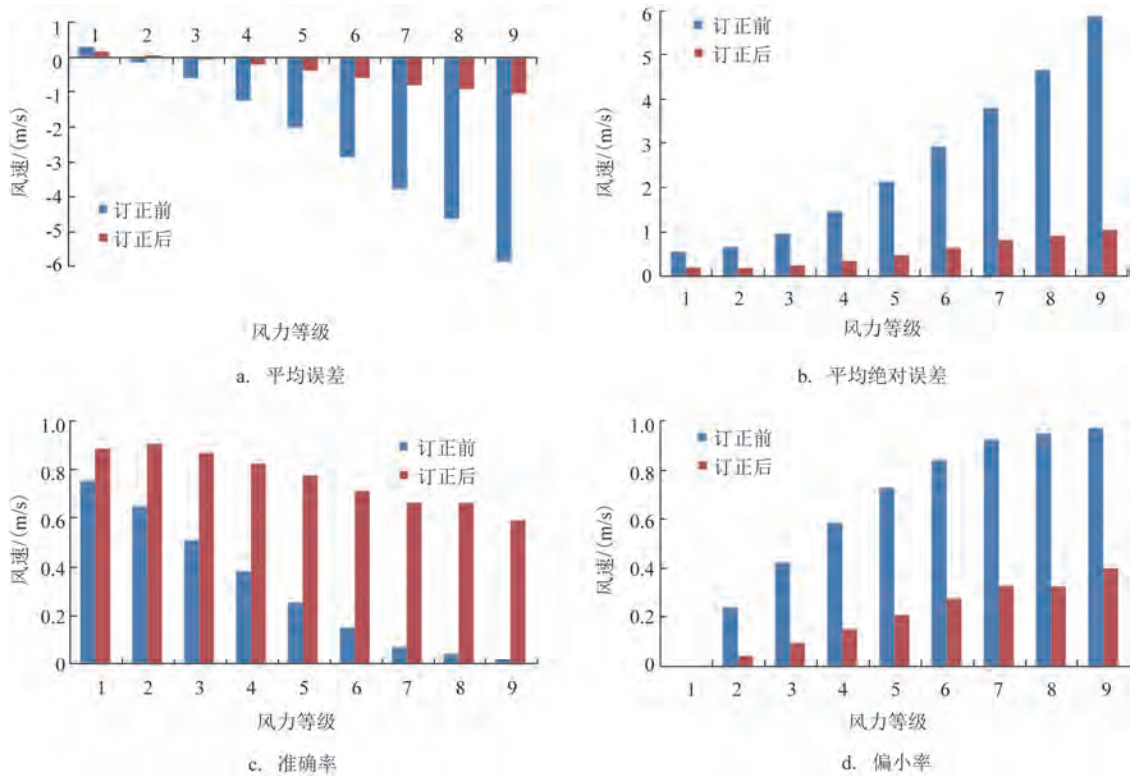


图4 非独立检验站点不同风力等级CLDAS数据与观测数据的检验结果

Fig.4 The inspection results of different wind levels at non independent testing stations between CLDAS data and observation data

倍,7级风(样本数为5 551)提升8.5倍,8级风(样本数为1 625)提升15倍,9级风(样本数为455)的准确率由0.02增大到0.59,提升了26倍(见图4c)。订正后CLDAS数据的偏小率也得到了较大程度的改善(见图4d),相比于订正前减小了58%~81%。

2.2 独立性检验

独立性检验站点的订正效果比非独立检验站点略差。订正前后CLDAS数据与观测数据的相关系数由0.92减小到0.90,平均误差由-0.38 m/s减小到-0.13 m/s,平均绝对误差由1.04 m/s增大到1.08 m/s,均方根误差由1.35 m/s增大到1.41 m/s。单独分析4个站点,A3176站点订正后的平均误差、平均绝对误差和均方根误差都有所减小,但其他3个站点略有增大(见表1)。

独立性检验站点1~8级风的样本数分别为4 014、8 784、8 744、6 150、2 641、847、198、19,对于不同等级风的检验结果显示(见图5),订正后的CLDAS数据质量优于订正前。订正前后1~2级风的平均误差都大于0,说明CLDAS风速大于观测风速,

表1 独立检验站点CLDAS数据与观测数据的检验结果

Tab.1 The inspection results at independent testing stations between CLDAS data and observation data

站点	类别	相关系数	平均误差/(m/s)	平均绝对误差/(m/s)	均方根误差/(m/s)
A3176	订正前	0.93	-0.59	0.86	1.18
	订正后	0.90	0.08	0.81	1.11
54638	订正前	0.85	0.67	0.96	1.34
	订正后	0.84	0.74	1.02	1.41
54750	订正前	0.96	-1.54	1.57	1.85
	订正后	0.94	-1.59	1.64	1.98
54465	订正前	0.94	-0.08	0.76	1.04
	订正后	0.93	0.27	0.86	1.15

速,订正后的误差略有增大;3级及以上风的平均误差都小于0,说明CLDAS风速小于观测风速,但订正后的误差较订正前有所减小,如订正后3~7级风的平均误差减小了6%~64%,5~7级风的平均绝对误差减小3%以上。另外,订正后4~7级风的准确

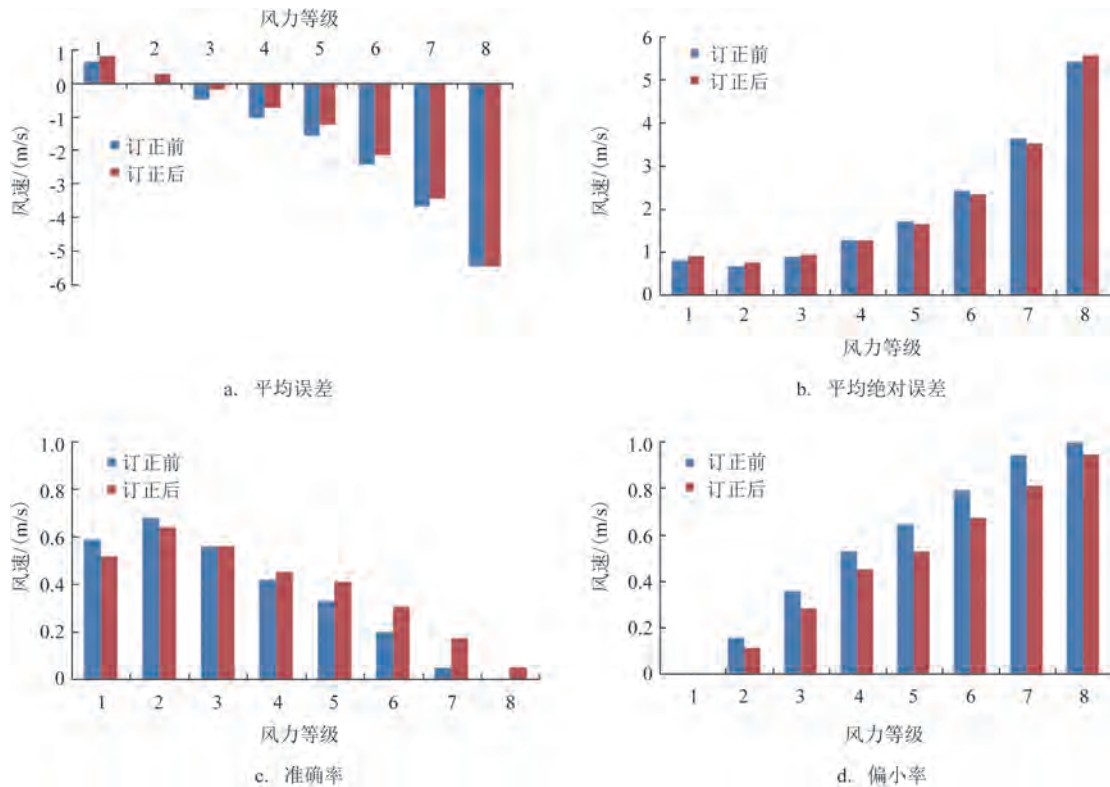


图5 独立检验站点不同风力等级CLDAS数据与观测数据的检验结果

Fig.5 The inspection results of different wind levels at independent testing stations between CLDAS data and observation data

率增大了0.36%~52%,8级风的准确率增大2.5倍,2~8级风的偏小率减小了5%~28%。说明对于独立性检验站点,风速等级越大,订正效果越好。

3 大风个例检验

2021年CLDAS平均10 m风速数据订正前后的空间分布显示(见图6),订正后渤海绝大部分区域的风速增大,增加值超过1.4 m/s,4个主要的风速增大区分别在辽东湾西北部、辽东湾南部、渤海湾以及渤海中部。个别区域订正后的CLDAS风速减小,两个主要的风速减小区在辽东湾中部和莱州湾,风速减小最大值约为0.6 m/s。选取2次大风个例,分析订正前后CLDAS 10 m风速数据与实况数

据的匹配度。

2021年1月27日夜间(北京时,下同)—28日上午,渤海海面出现7~9级西北风,28日08时A平台站(站号:54646)、28日10时大沽灯塔站(站号:54630)出现风速为21.9 m/s的大风,28日08时渤中3号站(站号:54642)出现20.4 m/s大风,09时旅大10号站(站号:54552)出现20.3 m/s大风。CLDAS 10 m风产品在27日后半夜和28日上午显示渤海海面为6~7级风,订正之后渤海湾和辽东湾的风速增大到8级,但仍未出现9级风。大沽灯塔站和旅大10号站的风速变化显示(见图7),订正前CLDAS 10 m风速与实况风速的变化趋势较为一致,但前者的数值明显偏小,订正后CLDAS 10 m风速改进明显,比实况风速略小。从1月27日20时—28日20

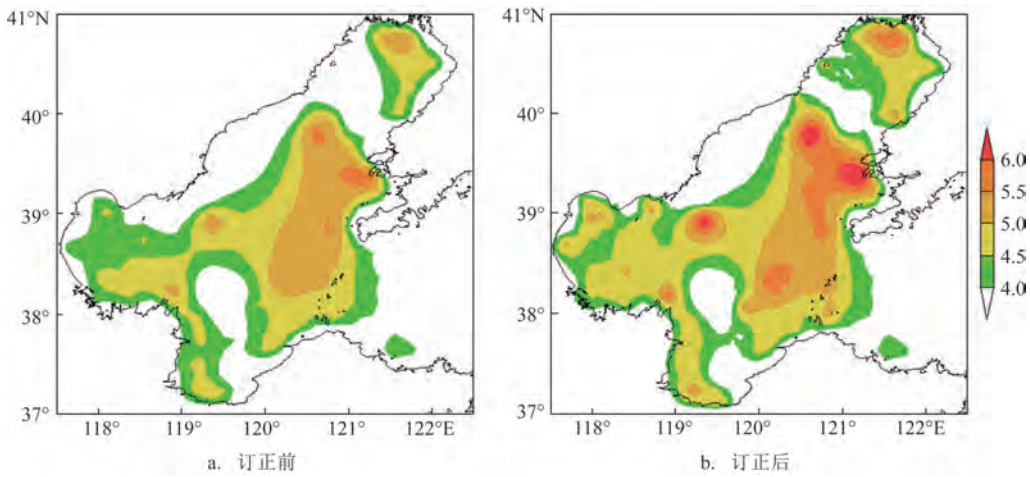


图6 CLDAS产品平均10 m风速数据订正前后空间分布(单位:m/s)

Fig.6 Spatial distribution of CLDAS mean 10-meter wind speed before and after correction (unit: m/s)

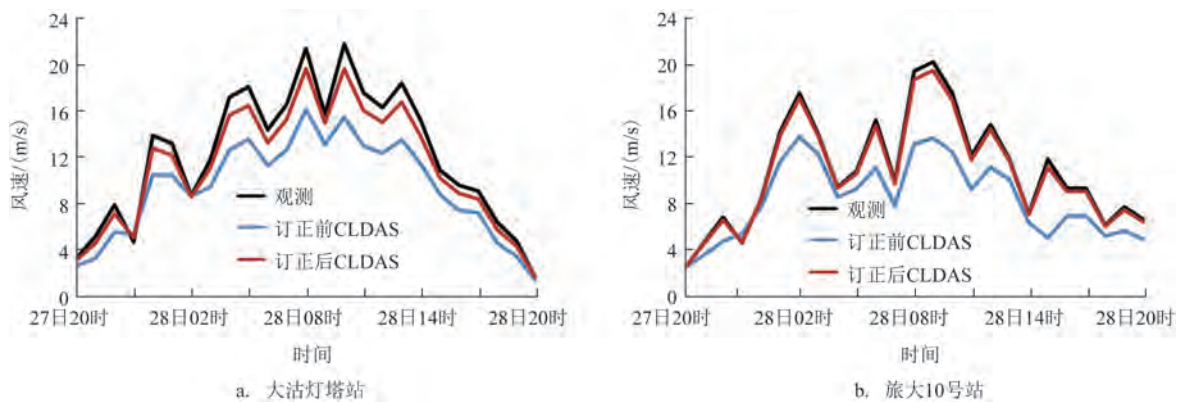


图7 站点观测风速、CLDAS 10 m风速和订正后的CLDAS 10 m风速

Fig.7 10-meter wind speed at two stations in the observation data, CLDAS data and corrected CLDAS data

时,大沽灯塔站观测的最大风速为21.9 m/s,订正前CLDAS的最大风速为15.6 m/s,订正后为19.8 m/s;旅大10号站观测的最大风速为20.3 m/s,订正前CLDAS的最大风速为13.7 m/s,订正后为19.5 m/s,订正效果较好。

2021年12月23—24日渤海出现8~10级东北风,24日01时前后洪西头站(站号:L2244)出现26.0 m/s大风,24日00时前后旅大10号站出现24.8 m/s大风,24日02时前后渤中35号站(站号:54649)出现20.9 m/s大风。CLDAS 10 m风产品显示,23日白天渤海有6~7级风,23日夜间—24日上午增大到8级,24日下午减小到6~7级。订正后CLDAS产品

显示,23日下午辽东湾出现7~8级风,渤海中南部出现6~7级风,23日夜间增大到8~9级,个别海域增大到10级,24日白天仍有7~8级风。旅大10号站、渤中35号站观测数据显示(见图8),23日白天—24日白天CLDAS 10 m风速明显小于观测风速,订正后CLDAS风速比观测风速略偏小,变化趋势也与实况极为接近。23日08时—25日08时,旅大10号站观测的最大风速为24.8 m/s,订正前的CLDAS最大风速为18.8 m/s,订正后为24.2 m/s;渤中35号站观测的最大风速为20.9 m/s,订正前的CLDAS最大风速为15.3 m/s,订正后为19.9 m/s,订正后的CLDAS数据质量明显优于订正前。

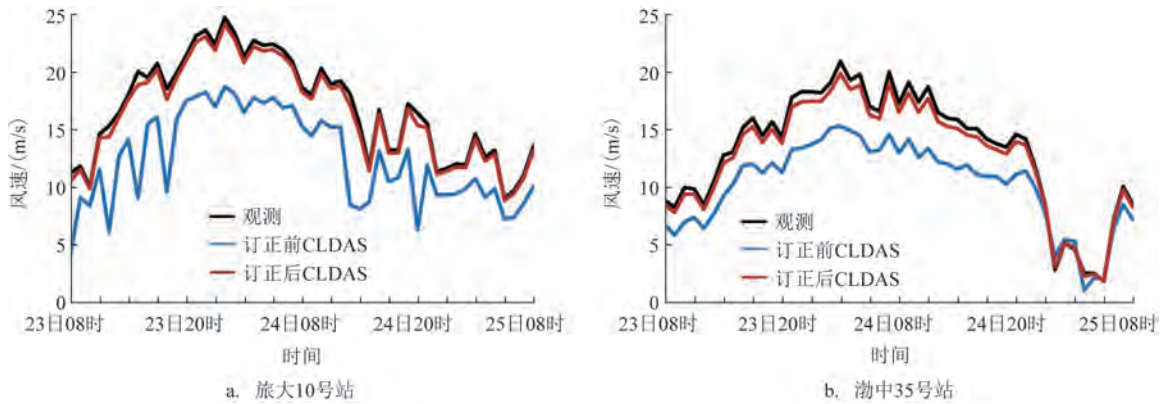


图8 站点观测风速、CLDAS 10 m风速和订正后CLDAS 10 m风速

Fig.8 10-meter wind speed at two stations in the observation data, CLDAS data and corrected CLDAS data

4 小结

利用2021年1月1日—12月31日环渤海沿岸自动站、海上石油平台站、浮标站、海岛站等125个站点的观测数据,采用最优插值法对渤海CLDAS 10 m风实况分析数据进行订正,选取4个站点不参与订正,分别进行订正前后的独立性与非独立性检验。结论如下:

①121个非独立检验站点的订正效果较好,平均相关系数由0.89增大到0.99,平均误差由-0.55 m/s减小到-0.05 m/s,平均绝对误差由1.02 m/s减小到0.27 m/s。不同海区的检验结果显示,莱州湾订正效果最好,平均绝对误差和均方根误差都减小了81.4%左右。不同风力的等级订正效果显示,9级及以上大风的订正效果最好,平均绝对误差由5.90 m/s减小到1.07 m/s,减小了81.8%,其他级别风的平均

绝对误差也减小了61%~79%。

②独立检验站点的订正效果略差,A3176站点订正后的平均误差、平均绝对误差和均方根误差有所减小,其他3个站点均略有增大。但不同风力等级的订正效果显示,4个站点4级及以上风的准确率有所增大,2~8级风的偏小率、3~7级风的平均误差、5~7级风的平均绝对误差有所减小。

③渤海绝大部分区域CLDAS 10 m风速在订正后有所增大,最大增加1.4 m/s以上,主要风速增大区在辽东湾西北部、辽东湾南部、渤海湾以及渤海中部。

④对2021年1月、12月的西北风、东北风大风个例检验结果发现,订正后的海上大风空间分布以及时间序列变化与实际观测情况更加接近,大风时段中CLDAS 10 m风速比观测风速偏小的劣势有明显改善。

参考文献:

- [1] 韩帅, 师春香, 姜志伟, 等. CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 102-108.
HAN S, SHI C X, JIANG Z W, et al. Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(1): 102-108.
- [2] 师春香, 潘昉, 谷军霞, 等. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
SHI C X, PAN Y, GU J X, et al. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2019, 77(4): 774-783.
- [3] 孙帅, 师春香, 梁晓, 等. 不同陆面模式对我国地表温度模拟的适用性评估[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6): 737-749.
SUN S, SHI C X, LIANG X, et al. Assessment of ground temperature simulation in China by different land surface models based on station observations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(6): 737-749.
- [4] 龙柯吉, 师春香, 韩帅, 等. 中国区域高分辨率温度实况融合格点分析产品质量评估[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 67-74.
LONG K J, SHI C X, HAN S, et al. Quality assessment of high resolution temperature merged grid analysis product in China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2019, 39(3): 67-74.
- [5] 刘莹, 师春香, 王海军, 等. CLDAS 气温数据在中国区域的适用性评估[J]. 大气科学学报, 2021, 44(4): 540-548.
LIU Y, SHI C X, WANG H J, et al. Applicability assessment of CLDAS temperature data in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(4): 540-548.
- [6] 齐铎, 刘松涛, 张天华, 等. 基于格点的中国东北中北部 2 m 温度数值预报检验及偏差订正[J]. 干旱气象, 2020, 38(1): 81-88.
QI D, LIU S T, ZHANG T H, et al. Grid temperature numerical forecast verification and correction over central and north region of northeast China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(1): 81-88.
- [7] 董春卿, 郭媛媛, 张磊, 等. 基于 CLDAS 的格点温度预报偏差订正[J]. 干旱气象, 2021, 39(5): 847-856.
DONG C Q, GUO Y Y, ZHANG L, et al. Deviation correction method of grid temperature prediction based on CLDAS data[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(5): 847-856.
- [8] 王丹, 王建鹏, 党超琪, 等. CLDAS 实况产品在陕西气温网格预报检验与订正中的应用[J]. 气象, 2023, 49(8): 946-957.
WANG D, WANG J P, DANG C Q, et al. Application of CLDAS in test and correction of grid temperature forecast in Shaanxi province[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(8): 946-957.
- [9] 杨富燕, 彭芳, 于飞, 等. CLDAS 温湿产品在贵州的适用性评估及订正[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 472-482.
YANG F Y, PENG F, YU F, et al. Evaluation of applicability and correction for the CLDAS temperature and relative humidity products in Guizhou province[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(2): 472-482.
- [10] 董祝雷, 赵艳丽, 冯晓晶, 等. CLDAS 气温和降水产品在内蒙古地区适用性分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(5): 811-819.
DONG Z L, ZHAO Y L, FENG X J, et al. Applicability assessment of CLDAS temperature and precipitation products in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(5): 811-819.
- [11] 穆建华, 纪晓玲, 贾乐, 等. 基于 CLDAS 的贺兰山区 5—9 月降水时空分布特征及其与地形的关系分析[J]. 气象科技, 2023, 51(6): 824-834.
MU J H, JI X L, JIA L, et al. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of precipitation from May to September in Helan Mountains and its relationship with topography based on CLDAS data[J]. Meteorological Science and Technology, 2023, 51(6): 824-834.
- [12] 朱科旭, 管琴, 白爱娟. 青海省洪涝灾害时空分布和致灾雨量特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024, 18(1): 81-88.
ZHU K X, GUAN Q, BAI A J. Characteristics of spatial and temporal distribution and disaster-causing rainfall of flood disasters in Qinghai province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2024, 18(1): 81-88.
- [13] 蒋雨荷, 黄晓龙, 李施颖, 等. 四川 CLDAS 5 km 小时能见度实况产品与能见度观测站资料质量对比评估[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 73-78.
JIANG Y H, HUANG X L, LI S Y, et al. Comparison and evaluation of the data quality between CLDAS 5 km hourly visibility products and visibility observation stations in Sichuan province[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2020, 40(3): 73-78.
- [14] 龙柯吉, 宋雯雯, 黄晓龙. 智能网格能见度实况融合格点分析产品在一次大雾天气过程中的评估[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 50-55.
LONG K J, SONG W W, HUANG X L. Evaluation of intelligent grid visibility live fusion grid analysis products in a dense fog weather[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2021, 42(4): 50-55.
- [15] 郭阳, 师春香, 徐宾, 等. CLDAS 陆面融合实况数据对天津雾和霾判识的准确性分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 657-665.
GUO Y, SHI C X, XU B, et al. Accuracy analysis of fog and haze identification based on CLDAS land surface fusion data in Tianjin[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 657-665.
- [16] 庄妍, 陈正洪, 钟水新, 等. 基于 CLDAS 资料的恩施山区成雾潜势指标特征及成因简析[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(4): 479-487.
ZHUANG Y, CHEN Z H, ZHONG S X, et al. Characteristics and simple analysis of fogging potential in the mountain area of Enshi based on CLDAS data[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42

- (4): 479-487.
- [17] 李施颖, 吴薇, 黄晓龙. 四川省CLDAS和ECMWF再分析数据风速产品评估[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(4): 70-76.
LI S Y, WU W, HUANG X L. Wind speed evaluation of CLDAS and ERA5-Land in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2020, 40(4): 70-76.
- [18] 曾晓青, 薛峰, 姚莉, 等. 针对模式风场的格点预报订正方案对比[J]. 应用气象学报, 2019, 30(1): 49-60.
ZENG X Q, XUE F, YAO L, et al. Comparative study of different error correction methods on model output wind field[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(1): 49-60.
- [19] 俞剑蔚, 李聪, 蔡凝昊, 等. 国家级格点实况分析产品在江苏地区的适用性评估分析[J]. 气象, 2019, 45(9): 1288-1298.
YU J W, LI C, CAI N H, et al. Applicability evaluation of the national gridded real-time observation datasets in Jiangsu province[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(9): 1288-1298.
- [20] 王丹, 杨艳超, 党超琪, 等. CLDAS 10 m风产品在陕西的质量检验分析[J]. 陕西气象, 2022(1): 17-21.
WANG D, YANG Y C, DANG C Q, et al. Quality inspection analysis of CLDAS 10 m wind products in Shaanxi[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2022(1): 17-21.
- [21] 刘卫华, 金巍, 王会品, 等. 2020年CLDAS风场数据在辽宁省的适用性分析[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(6): 61-68.
LIU W H, JIN W, WANG H P, et al. Analysis of the applicability of CLDAS wind field data in Liaoning province in 2020[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(6): 61-68.
- [22] 王亚男, 李英华, 孙密娜. 下垫面对渤海西部雷雨大风影响的数值模拟分析[J]. 海洋预报, 2019, 36(3): 24-32.
WANG Y N, LI Y H, SUN M N. Numerical simulation study of the effect of underlying sea surface on thunderstorm wind in the western Bohai Sea[J]. Marine Forecasts, 2019, 36(3): 24-32.
- [23] 刘志杰, 刘彬贤, 王锐, 等. 基于传统和深度学习技术的黄渤海域大风预报方法研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 34-43.
LIU Z J, LIU B X, WANG R, et al. Research on the gale prediction methods in the Yellow Sea and Bohai Sea based on traditional and deep learning technologies[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 34-43.
- [24] 孙晓磊, 张唯, 胡田田, 等. 弱冷空气引起渤海湾大风的时空分布特征及环境条件分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 44-54.
SUN X L, ZHANG W, HU T T, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and environmental conditions of gales caused by weak cold air over the Bohai Bay[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 44-54.
- [25] 李建通, 杨维生, 郭林, 等. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J]. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
LI J T, YANG W S, GUO L, et al. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(2): 263-270.
- [26] 韩焱红, 邵静静, 苗蕾, 等. 基于最优插值的雷达定量降水估测订正及应用——以广元市为例[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(3): 82-85.
HAN Y H, GAO J J, MIAO L, et al. Correction for radar-derived quantitation precipitation estimation based on the optimum interpolation and its application——taking Guangyuan as an example[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2019, 39(3): 82-85.
- [27] 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J]. 气象学报, 2012, 70(6): 1381-1389.
PAN Y, SHEN Y, YU J J, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(6): 1381-1389.
- [28] 王福增, 温凯, 何山, 等. 多源降水量数据融合分析及评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(5): 647-654.
WANG F Z, WEN K, HE S, et al. Analysis and evaluation of multi-source merging precipitation data[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(5): 647-654.
- [29] 蔡志颖, 郑艳, 段晶晶, 等. 台风“烟花”影响浙江期间GPM卫星降水产品的评估及订正[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(6): 704-715.
CAI Z Y, ZHENG Y, DUAN J J, et al. Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during typhoon “In-Fa” affecting Zhejiang[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(6): 704-715.

Objective correction of CLDAS Bohai Sea wind based on optimal interpolation method

SHI Dedao^{1,2}, SU Hang², LIU Dehao², HAN Peipei²

(1. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China)

Abstract: Using the observation data from 125 stations along the coast and offshore in the Bohai Sea, the optimal

interpolation method is used to correct the China Meteorological Administration Land Data Assimilation System (CLDAS) 10-meter wind data. The results show that through correction, the correlation coefficient between the observation data and CLDAS data increases from 0.89 to 0.99, the mean absolute error decreases from 1.02 m/s to 0.27 m/s, and the root mean square error decreases from 1.63 m/s to 0.36 m/s. Among the different areas of the Bohai Bay, Laizhou Bay, Liaodong Bay, central Bohai Sea, and Bohai Strait, the best correction effect is achieved in the Laizhou Bay, with the mean absolute error and root mean square error reduced both by about 81.4%. The correction effect of different wind levels shows that the mean absolute error of winds below level 3 decreases from 0.5~1.0 m/s to below 0.3 m/s, that between levels 4 and 8 decreases from 1.4~4.7 m/s to below 1.0 m/s, and that above level 9 decreases from 5.9 m/s to 1.1 m/s. The validation of two strong wind processes in 2021 shows that the corrected CLDAS 10-meter wind speed increases significantly, the trend and wind speed maximum area are more closely aligned with the observed data.

Key words: CLDAS; optimal interpolation method; strong sea wind; objective correction